

УДК 621.746.58

Флокени в сталі (огляд)

Б.Б. Винокур, доктор технічних наук, професор

Філадельфія, США

Зроблено огляд і критичний аналіз даних щодо природи утворення флокенів. Дано практичні рекомендації стосовно режимів попередньої термічної обробки поковок після гарячої деформації для усунення флокуєтворення в легованих конструкційних сталях.

Наприкінці 19 ст. в Німеччині увагу дослідників привернули факти руйнування головок залізничних рейок, які не знаходили наукового пояснення. На поверхнях руйнування (зломах) рейок спостерігали світлі плями округлої форми розміром від 0,5 до 30 – 35 мм кристалічна будова яких не підпадала під відомі на той час характеристики в'язкого чи крихкого руйнування. Границі їх чітко окреслені і не мають перехідних зон від дефекту до здорового металу. Ці утворення в структурі злomu нагадували пластівці (нім. Flocken) і назва “флокен” увійшла до виробничої і наукової практики. Колір флокенів у зломі може змінюватись від сріблястого світлого до сірого матового залежно від складу сталі, але ніколи не співпадає за кольором і кристалічною будовою злomu основного металу (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Флокени у зломах сталей 38ХНЗМФА (а) і 34ХНМ (б). x 100.

На протравленій поверхні шліфа у поперечному перерізі флокени мають вигляд прямих ліній тонших від волосини. Тому такі тріщини називають волосиновими. Як концентратори напружень і осередки розвитку магістральних тріщин флокени можуть призвести до непоправних руйнувань виробів і конструкцій.

Флокенами вражаються лише внутрішні шари гарячедеформованих (поковок, прокату, штамповок) заготовок або готових виробів. Розташовуються флокени у напрямку деформації металу на глибині, яка залежить від розмірів виробів, режимів деформації, охолодження, складу сталі та інших факторів.

Утворюються флокени лише у виробках з конструкційних сталей із вмістом вуглецю в межах від 0,2 % до евтектоїдного. Вони практично не спостерігаються у

маловуглецевих конструкційних, феритних, аустенітних, ледебуритних сталях після гарячої деформації, в литих сталях будь-якого класу.

Нова хвиля масового виникнення і дослідження флокенів припадає на тридцять років минулого сторіччя була зумовлена широким виробництвом і використанням легованих сталей. Було з'ясовано, що основною причиною утворення флокенів є підвищений вміст водню в сталях, а також значні напруження (внутрішні або зовнішні). Узагальнення уявлень щодо флокенотворення були викладені у книзі В.Я. Дубового [1] та інших публікаціях більш пізнього періоду [2 – 9]. Виходили з того, що при охолодженні поковок після гарячої деформації атомарній водень виділяючись з твердого розчину згодом переходить в молекулярну форму і зумовлює підвищення внутрішніх напружень розтягування. Накладаючись на напруження внаслідок фазових перетворень загальні напруження перевищують поріг міцності сталі і призводять до виникнення тріщин. Проте не було з'ясовано в яких місцях металевої матриці вірогідне скупчення

водню. Це стало можливим при застосуванні електронного мікроскопу [10 – 16]. Автори цих робіт вважають, що вірогідним механізмом утворення флокенів є дифузія і адсорбція дуже рухливих атомів водню біля дефектів кристалічної ґратки, неметалевих вкраплень, ліквідаційних дефектів тощо. В цих місцях може відбуватись перехід від атомного стану водню до молекулярного (рис. 2). Припущення, що адсорбція водню на поверхнях мікрodefektів термодинамічно виправдане, не було підтверджене відповідними розрахунками або експериментами.

Відсутність флокенів у виливках сталей узгоджується з уявленням про відносно нещільну структуру литого металу, в якій водень може скупчуватись у порах, дифундувати в атмосферу і не викликати утворення флокенів.

З невідомих причин певна кількість публікацій розглядає утворення флокенів у зв'язку з наявністю у структурі сульфідів. При

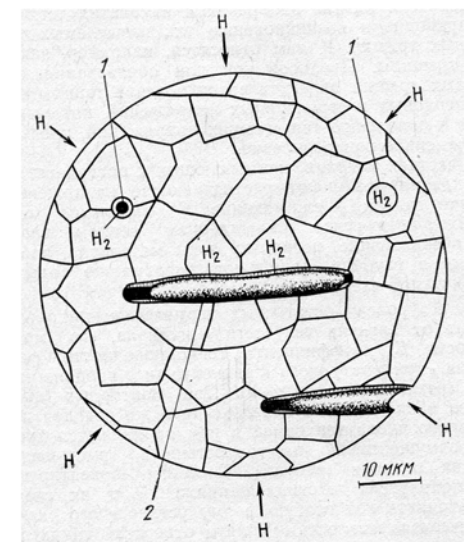


Рис. 2. Схема проникнення водню у сталь при наявності пор і включень [20]. 1 – пори; 2 – включення, наприклад MnS.

цьому не враховується присутність інших неметалевих фаз – оксисульфідів, оксидів, нітридів і карбідів різних елементів. На нашу думку гіпотеза щодо початку утворення флокенів на гострих кінцях сульфідів дуже сумнівна оскільки руйнування металу зумовлене тиском молекулярного водню повинно було б відбуватись тільки крізь м'який сульфід. Проте флокен має чітко окреслені границі і ніхто не знаходив присутності сульфідів ні в самому флокені, ні біля його границь. Щодо гіпотези про вплив інших неметалевих вкраплень, то для її підтвердження необхідні серйозні експериментальні докази.

Найбільш глибокі дослідження зв'язку якості сталей з флокенотворенням проводили на заводах важкого машинобудування, де маса зливок досягає 200 т, перетин – до 2000 мм, довжина понад 20 м. Використовувані леговані конструкційні сталі містили значну кількість хрому, нікелю марганцю і домішки молібдену, вольфраму, титану, ванадію. Для забезпечення значних ступенів деформації при виготовленні заготовок деталей застосовували складні режими кування і проміжних операцій

термічної обробки. Наявність флокенів на той час вдавалось виявити тільки після кінцевої термічної і механічної обробок та значного видалення поверхневих шарів готових виробів. Протравлена 15 % водним розчином пересульфату алюмінію в суміші з 10 % розчином азотної кислоти, поверхня оглядалась через 10 хв, повторно через 1 год і остаточно через добу. Такий контроль не гарантував відсутності появи флокенів через тривалий час. Практика показала, що процес утворення флокенів має інкубаційний період. Підтвердженням цього є свідчення академіка І.А. Одингa у 50-х роках минулого сторіччя стосовно досліджень диску турбіни крейсера Чорноморського флоту після 11 років експлуатації. Після роботи при температурі 475 °С і тиску 90 атмосфер розрізаний диск був повністю уражений флокенами. Дивно, що диск не зруйнувався. І.А. Одинг вважав, що причиною цього була підвищена пластичність металу, яка послабила концентрацію локальних напружень в зоні флокенів.

З середини 50-х років минулого сторіччя впроваджено метод ультразвукового контролю. При наявності флокенів бракувалась поковка а не готовий виріб. Це важливо оскільки у важкому машинобудуванні кожна великогабаритна деталь є єдиною у замовленні і збитки від браку по флокенам є дуже значними. Автору довелось бути присутнім при виготовленні вала гребного гвинта атомного криголаму. Для цього зливку масою 200 т кували під пресом з зусиллям 10 тисяч тон за кілька прийомів з проміжним триразовим відпалюванням та нагрівали до температури деформації. Тривалість режимів відпалу і кінцевої термічної обробки поковки довжиною 26 м, діаметром основної частини 1000 мм і головної 1600 мм перевищувала місяць. Після цього заготовку піддавали складній механічній обробці. Якщо припустити що на зразках з цього диску наявність флокенів, то вал необхідно було б бракувати і виготовляти новий. Відзначимо, що таких пресів в Україні було лише три і їх завантаження регулював прем'єр-міністр.

Складність вивчення природи флокенів пов'язана з трудомісткістю і дорожнечою виготовлення зразків великих розмірів. У сталях однакового хімічного складу, режимів кування і термічної обробки флокени частіше спостерігаються в поковках більшого розміру. Практика показала, що сталі основної виплавки більш чутливі до утворення флокенів ніж кислі. У 100 г кислої мартенівської сталі водню може бути до 4 см³, в основній – понад 12 см³. Влітку вірогідність утворення флокенів зростає.

В процесі гарячої пластичної деформації і охолодження після неї водень не встигає в достатній кількості виділитись із сталі. Проте він не здатен порушити суцільність металу доки той знаходиться у пластичному (аустенітному) стані. Флокени утворюються при охолодженні нижче температури мартенітного перетворення (≈ 300 °С) залежно від складу конструкційної сталі. Відзначимо, що швидкість дифузії водню в α -фазі у кілька разів менша ніж у γ -фазі. В утворенні флокенів значну роль відіграють також скупчення водню внаслідок зменшення його розчинності при зниженні температури. Ці скупчення виникають внаслідок дифузії атомарного водню у вільні місця кристалічної ґратки і несуцільності структури сталей і перетворення його в молекулярний. Це призводить до зростання розтягуючих напружень, які можуть сприяти крихкому руйнуванню. Різниця у швидкості дифузії водню у слабо і сильно деформованих об'ємах металу може призвести до скупчення його в областях пластичного ковзання.

Раціональним методом боротьби з флокенами є вакуумне розливання сталі. Протягом кількох десятиріч цей метод впроваджується у виробництво із значним економічним ефектом, в тому числі за рахунок скорочення режимів попередньої

термічної обробки і виключення браку за флокенами.

Метод електрошлакового лиття дозволяє суттєво поліпшити структуру, механічні і експлуатаційні властивості сталі. Проте ніхто не звертав уваги на наявність і кількість водню у металі електрошлакового переплаву. Це призвело до випадків руйнування прокатних валків на одному з металургійних заводів України. Дослідженнями на Ново краматорському машинобудівному заводі показано, що причиною їх руйнування був високий вміст водню. Звичайне відпалювання не забезпечувало потрібної якості металу щодо флокеноутворення. Можна припустити, що водень міг потрапити до металу внаслідок ежекції повітря в процесі електрошлакового плавлення. Валки холодного прокатування піддають поверхневому гартуванню струмами промислової частоти і негайному наступному відпуску у масляній ванні з температурою 180 °С [18]. Якщо щось заважає негайному проведенню відпуску, валок руйнується із звуком гарматного пострілу і уламки його розлітаються на десятки метрів. В описаних випадках мав місце інкубаційний період утворення флокенів, що призводило до руйнування валків. Відомо, що структури таких сталей чисто щодо сульфідів [19] і утворення флокенів в них не підтверджує зв'язок їх з наявністю сульфідних крапель.

Практика виробництва великих поковок показала, що за ступенем флокеночутливості сталі доцільно поділити на 3 групи. До першої групи можуть бути віднесені вуглецеві і марганцеві сталі, до другої – мало леговані хромисті та хромомарганцеві, до третьої – високолеговані нікелеві, хромонікелеві, хромонікельмолібденові, хромомарганцевовольфрамові тощо.

Поковки сталей першої групи всіх розмірів при вмісті вуглецю до 0,3 % можна охолоджувати на повітрі. Для конструкційних сталей з вмістом вуглецю вище 0,3 % цей режим можна реалізувати для поковок перерізом до 500 мм. Поковки перерізом 500 – 800 мм слід охолоджувати у пісочній ямі. Більш великі поковки необхідно охолоджувати у печі з температурою 300 – 320 °С (рис. 3, позиція 1) до повного вирівнювання температури по всьому перерізу. Після цього здійснюють витримування

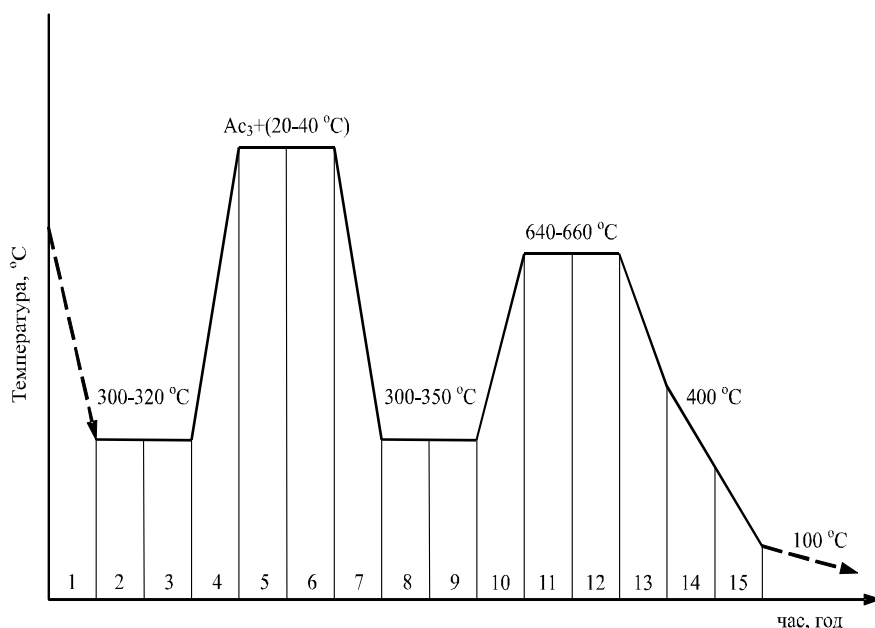


Рис. 3. Режим відпалу сталей першої групи флокеночутливості.

(рис. 3, позиція 3) тривалістю з розрахунку 2 год на кожні 100 мм. Далі поковку нагрівають з максимальною швидкістю до температури вище критичної точки A_{c3} на 20 – 40 °С (позиція 4), вирівнюють температуру по перетину (позиція 5) і витримують при цій температурі з розрахунку по 30 хв на кожні 100 мм (позиція 6). Далі охолоджують метал до 300 – 350 °С (позиція 7) його поверхні. Після вирівнювання температури по перерізу поковки (позиція 8) її витримують у печі по 2 години на кожні 100 мм (позиція 9), а далі нагрівають до температури відпуску 640 – 660 °С (позиція 10), вирівнюють по температурі (позиція 11), витримують по 2 години на кожні 100 мм (позиція 12).

Наступне охолодження є найбільш відповідальною операцією відпалу. Швидкість охолодження до температури 100 °С не повинна перевищувати 40 °С/год (позиція 13), далі охолодження на повітрі.

Відпал поковок сталей другої групи флокеночутливості здійснюють за аналогічними режимами (позиції 1-5), витримка при температурі $A_{c3} + (20 - 40 \text{ }^\circ\text{C})$ дорівнює 40 хв на кожні 100 мм (позиція 6), наступне охолодження до 200 – 250 °С. Подальші позиції термічної обробки такі ж як і для сталей першої групи (позиції 8, 11). Далі здійснюють більш складний двократний відпуск при 640 – 660 °С з наступним охолодженням до 200 – 250 °С в печі з розкритими кришками і шиберами (позиції 12, 13). Тривалість обробки – 3 години на кожні 100 мм, далі режими обробки є аналогічними сталям першої групи.

Для сталей третьої групи тривалість витримування при температурі $A_{c3} + (20 - 40 \text{ }^\circ\text{C})$ рекомендована з розрахунку 1 год на кожні 100 мм по перерізу поковки, а витримка при 640 – 660 °С зростає і дорівнює 4 год на кожні 100 мм. Швидкість охолодження після другого відпуску до температури 400 °С зменшено до 30 °С/год, а після температури 100 °С до 15 °С/год.

Існують режими антифлокенової термічної обробки, які включають перекристалізацію і високий відпуск. Проте нема наукового пояснення чому в деяких випадках доцільно проводити два цикли перекристалізації а не один з подвійною тривалістю нагріву. Немає чіткої відповіді щодо регульованої швидкості охолодження. відповіді на ці та інші питання щодо флокеноутворення потребують подальших системних досліджень на багатотонних поковках і значних матеріальних витрат. На жаль в Україні нема єдиного науково-технічного центру дослідження водню в металах і причин утворення флокенів в різних деформівних сталях.

Література

1. Дубовой В.Я. Флокены в стали. – М.: Металлургиздат, 1950. – 212 с.
2. Склюев П.В. Водород и флокены в крупных поковках. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
3. Лашко Н.Ф. // Сталь. – 1952. - №12 – С. 32 – 38.
4. Лошкарев В.Ф. // Сталь. – 1952. – № 2. – С. 48 – 52
5. Бапгизманский В.И // Сталь. – 1933. - № 1 – С. 22 – 23.
6. Носырева С.С. // Сталь. – 1954. – №1 – С. 36 – 39.
7. Брайнин И.Е. // Сталь. – 1954. – № 4. – С. 52 – 57.
8. Грдина Ю.В., Зубарев В.Ф. // Сталь. – 1954. – № 4. – С. 36 – 38
9. Меськин В.С. Основы легирования стали. - М.: Металлургия, 1966. – 312 с.
10. Чучмарев С.К., Старчак В.Г., Барг Л.Г. // Известия АН СССР. Металлы. – 1972. – № 1. – С. 42 – 44.
11. St. Pierre C.-R., Protasico S. Influence of the Content of Sulfur and Morphology of Inclusion of Hydrogen Flakes and the Cracks Included by Hydrogen. // Int. Met. Rev. – 1976, – .21, P. 269 – 279.

12. Гельд П.В., Рябов Р.А., Кодес Е.С. Водород и несовершенство структуры металла. – М.: Металлургия, 1979. – 320 с.
13. Штремель М.А., Князев А.А., Либерсон А.Г. // ФММ. – 1982. – № 4. – С. 804 – 805.
14. Коллишон Э.В., Постнов Л.М., Сочивко А.Б. и др. // МиТОМ. – 1987. – № 1. – С. 5 – 7.
15. Вороненко Б.И. Водород и флокены в стали. // МиТОМ. – 1997. – № 11. – С. 12 – 18.
16. Мирзаев Д.А., Фоминых Е.А., Токовой О.К. // ФММ. – 2007. – 103. – С. 303 – 309.
17. Михайлов-Михеев П.Б., Один И.А. Металл газовых турбин. – М.: Машгиз, 1958. – 232 с.
18. Воробьев Н.И., Токовой О.К., Кодес А.В. // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 2003. – № 2. – С. 18 – 20.
19. Волков С.Е., Волков А.С., Забалуев Ю.И. Неметаллические включения в электрошлаковом слитке. – М.: Металлургия, 1979. – 218 с.
20. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.

Одержано 06.01.09

Б. Винокур

Флокены в стали

Резюме

Сделан краткий обзор литературы о природе образования флокенов и методов их выявления. Дан критический анализ существующих гипотез возникновения флокенов и практические рекомендации предварительной термической обработки поковок для устранения флокенов в крупных поковках различно легированных конструкционных сталей.

B. Vinokur

Flakes in steel

Summary

It is made the brief review of the literature on the nature of flakes formation and methods of their revealing. It is given the critical analysis of existing hypotheses of flakes occurrence from the point of view of discrepancy with practice of their formation. The practical methods of preliminary heat treatment of hot deformed metal which allow to eliminate flakes formation in large forgings of variously alloyed constructional steels are presented. The scientific explanation of some points of these processes is required.