

УМОВИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІЧНОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАРІННЯ В СТАЛІ

В порівнянні з односпрямованим деформуванням, попереднє навантаження стискуванням супроводжується зсувом моменту формування першого зриву напруження при розтяганні у бік більш великих деформацій. Величини попередньої деформації стискуванням і виникнення першого зриву напруження при розтяганні практично дорівнюють одне одному.

Ключові слова: сталь, розтягання, напруження, деформація, падіння напруження, деформаційне старіння, реверсивна деформація

По сравнению с однонаправленным деформированием, предварительное нагружение сжатием приводит к сдвигу момента формирования первого срыва напряжения при растяжении в сторону больших деформаций. Величины предварительной деформации сжатием и появления первого срыва напряжения практически равны между собой.

Ключевые слова: сталь, растяжение, напряжение, деформация, падение напряжения, деформационное старение, реверсивная деформация

Contrary to the one-sided straining, after compressive predeformation with subsequent tension the shift of appearing the first stress stall to higher values of strains can be observed. The values of compressive predeformation and the strain of first stress stall appearance are approximately equal.

Keywords: steel, stretching, stress, strain, stress stall, deformation ageing, reverse deformation

В процесі експлуатації елементи рухомого складу піддаються дуже складним статичним і динамічним навантаженням, що супроводжується обов'язковою зміною комплексу властивостей металевих матеріалів. Особливо небезпечними являються напруження що циклічно змінюються, втому числі зі зміною напрямку навантаження. Після визначеного терміну часу експлуатації, незалежно від структурного стану металу, накопичення дефектів кристалічної будови приведе до зниження опору виробу зародженню осередків руйнування. З іншого боку, при зміні знаку навантаження розвиток процесів анігіляції за визначених умов, може приводити до уповільнення темпу накопичення дефектів в металі виробу, сприяючи зсуву моменту виникнення ушкодження в сторону більш тривалого терміну експлуатації. Враховуючи, що процеси дифузійного масопереносу в значній ступені прискорюються при підвищенні температури, переміщення домішкових атомів (в першу чергу вуглецю для сталей) до дефектів кристалічної будови буде супроводжуватися неодмінним зниженням їх рухомості. На підставі цього, розвиток процесів блокування руху дислокацій під час навантаження виробу приведе до обов'язкового окрихлення металу і, як наслідок цього, до передчасного його вилучення із експлуатації. Наведене явище в літературі має назву деформаційне старіння [1].

Метою роботи було вивчення умов розвитку процесів деформаційного старіння під час навантаження у вуглецевих сталях в залежності від схеми деформування.

Матеріалом для дослідження були вуглецеві сталі з кількістю вуглецю 0,1 та 0,5 %. Вихідний структурний стан – після нормалізації. Дослідження проводили при односпрямованому і реверсивному деформуванні при температурі 250 °С.

При визначеному співвідношенні температурних і швидкісних параметрів деформування та структури металу, на діаграмі розтягання можуть виникати немонотонності в зміні деформуючого напруження. Якщо при відносно низьких температурах навантаження зриву напруження обумовлені розвитком пластично нестабільної течії [2], то при підвищених температурах немонотонні зміни напруження пов'язані з іншими процесами.

Найбільш поширене пояснення щодо природи виникнення наведених зривів деформуючого напруження при підвищених температурах, як показано вище, засноване на взаємодії рухомої дислокації с хмарами домішкових атомів. Наведені об'єми металу з підвищеною концентрацією домішкових атомів можуть формуватися як в процесі руху дислокацій [1], так і за визначений термін часу, який ще називають часом очікування (τ_0) [3]. Розглядаючи кінетичні умови процесу блокування рухомої дисло-

кації хмарою з домішкових атомів, що називають динамічним деформаційним старінням (ДДС), було визначено, що максимальний ефект досягається при виконанні співвідношення [1, 3]:

$$\dot{\varepsilon} = \rho_m \frac{l \cdot b}{\tau_0}, \quad (1)$$

де ρ_m – густина рухомих дислокацій;

$\dot{\varepsilon}$ – макроскопічна швидкість деформації;

l – довжина вільного пробігу дислокації;

b – вектор Бюргерса.

Аналіз співвідношення (1) показує, що за умов постійної величини $\dot{\varepsilon}$, люба зміна τ_0 повинна мати свій відбиток на ρ_m .

Проведеними дослідженнями [2] було визначено, що формування зривів на кривій односпрямованого навантаження залежить від кількості вуглецю в сталі та мають свої особливості при виникненні. Так, в першому наближенні, за феноменологією зубчасту течію можна розділити на два типи. До першого типу слід віднести виникнення окремих, ізольованих зривів деформуючого напруження, які чергуються з гладкими ділянками кривої навантаження (рис. 1). Другий тип – це коли на визначеній ділянці спостерігають формування зривів з неухильним зростанням амплітуди коливань деформуючого напруження (σ_D). Після досягнення визначеного значення деформації відбувається зниження величини σ_D . Після наведеного етапу знову формуються умови виникнення ділянки зривів з неухильним наростанням амплітуди. Порівняльний аналіз показує, що у більшості випадків при малих сумарних пластичних деформаціях виникають зриви напруження першого типу. Після деформацій, які перебільшують приблизно 4...6%, спостерігають формування зривів напруження другого типу. З урахуванням складних процесів, що відбуваються в металі під час деформації при підвищених температурах, межа, яка розділяє ділянки з різною морфологією зривів напруження, може бути характеристикою, що дозволить визначити природу наведеного явища. Порівняльний аналіз положення межі по шкалі деформацій, яка відповідає зміні характеру зривів напруження (позначимо як ε_1), з деформацією моменту виникнення другої ділянки в області однорідного деформаційного зміцнення (ОДЗ), указує на існування зв'язку між ними [4]. З іншого боку, як показано в [2], виникнення переламу в області ОДЗ на логарифмічній діаграмі обумовлено

формуванням дислокаційної чарункової структури замість приблизно однорідного розподілу дислокацій, так і зриви напруження повинні бути зв'язані з якісними змінами внутрішньої будови металу.

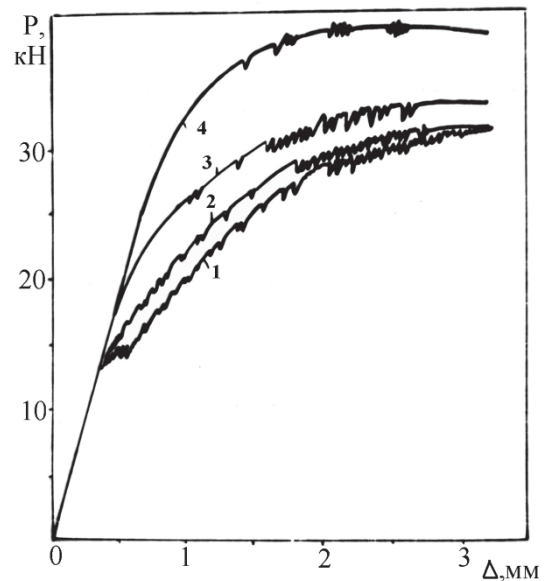


Рис. 1. Вигляд кривих розтягання при температурі 250 °С після попередньої деформації стискуванням (1 – 0%; 2 – 2%; 3 – 5% і 4 – 10%) вуглецевої сталі з 0,1% С

Так, порівняно з односпрямованим навантаженням, для якого деформація виникнення зривів навантаження співпадає з моментом досягнення напруження плинності [1], зміна знаку деформації, навпаки, супроводжується суттєвим зсувом по шкалі деформацій моменту виникнення першого зриву в сторону більших значень [4]. Для визначення причин, що приводять до гальмування розвитку процесів ДДС при зміні знаку навантаження, розглянемо поведінку металу в області малих пластичних деформацій, з використанням величини необерненого руху дислокацій – σ_0 :

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{k_y}{\sqrt{2d}} + \alpha \mu b \sqrt{\rho_m}, \quad (2)$$

де σ_i – напруження тертя кристалічної решітки металу;

k_y – коефіцієнт, який оцінює опір границі зерна деформації, що розповсюджується;

d – розмір зерна;

α – параметр, що визначає вплив швидкості деформації на σ_0 ;

μ – модуль зсуву.

Як свідчать експериментальні дані [1, 2], збільшення кількості вуглецю в сталі і ступеня

односпрямованої деформації приводять до зростання величини σ_0 . Після зміни напрямку навантаження характер залежності наведеної величини стає складнішим. Так, зростання попередньої деформації, наприклад стискуванням (ϵ_2) супроводжується при послідовному розтяганні спочатку зниженням σ_0 , а потім зростанням (рис. 2). Наведений характер зміни σ_0 в значній ступені подібний залежності при розвитку ефекту Баушингера при нормальних температурах нагріву. Розглядаючи окремі складові рівняння (2), необхідно відзначити, що за умов постійних температури та швидкості деформації впливом перших двох додатків можна зневажити. Тоді співвідношення (2) прийме вигляд:

$$\sigma_0 \approx \sqrt{\rho_m} \cdot \quad (3)$$

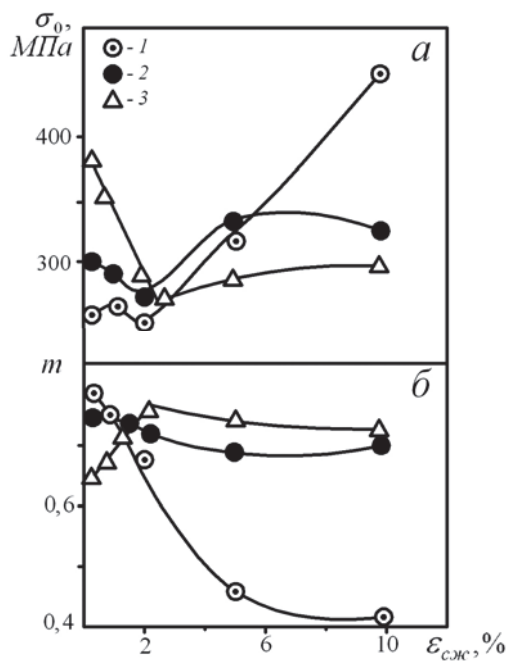


Рис. 2. Вплив ступеня деформації стискуванням на σ_0 (а) і коефіцієнт деформаційного зміцнення (m) (б) при розтяганні. Температура випробування 250 °С

Аналіз співвідношення (3) показує, що за умов зміни знаку навантаження, на початкових етапах деформування зниження ρ_m , яке обумовлене розвитком процесів анігіляції дислокацій що введені при попередньому навантаженні, приведе до зміни умов (1). В свою чергу це приведе до зміни співвідношення між часом очікування (τ_0) та часом середнього пробігу дислокацій (τ_1). З урахуванням того, що для розвитку процесів ДДС необхідно виконання

умов $\tau_0 \approx \tau_1$, компенсувати наведений вплив можна за рахунок зниження $\dot{\epsilon}$. За незмінної $\dot{\epsilon}$, для підтримки умов розповсюдження пластичної деформації підвищаться локальні швидкості руху дислокацій, внаслідок чого зменшиться τ_1 . За умов $\tau_1 < \tau_0$ процеси ДДС не будуть мати розвитку. При послідовному деформуванні розтяганням, пропорційно ступеню пластичної деформації ρ_m буде зростати, а система почне наближатися до умов розвитку процесів ДДС лише після $\tau_0 \approx \tau_1$. Враховуючи, що текуче значення напруження течії підпорядковується рівнянню (2), умови розвитку ДДС будуть досягнуті лише після деформації, яка приблизно дорівнює деформації попереднього стискування. Підтверджується наведене положення залежностями, які наведені на рис. 2. З іншого боку, на прикладі низьковуглецевої сталі (0,1 % С) визначено, що після малих ступенів деформації густина дислокацій поблизу меж між зернами фериту буде більшою, ніж всередині зерна [1], більшою буде також і концентрація домішкових атомів поблизу меж. В процесі попереднього стискування домішкові атоми (атоми вуглецю) в першу чергу будуть взаємодіяти з дислокаціями поблизу меж між зернами, гальмуючи їх рух. Після зміни знаку навантаження (початок розтягання) дислокації, які розташовані всередині зерна, після стискування будуть взаємодіяти з новими, що врешті-решт приведе до їх анігіляції і зниження σ_0 . Протилежно цьому дислокації, що заблоковані при стискуванні та які розташовані поблизу меж між зернами, навпаки – будуть сприяти підвищенню величини σ_0 [4]. Ефект сумарного впливу на σ_0 наведений на рис. 2.

В сталях із підвищеним вмістом вуглецю об'ємна частка цементиту буде збільшуватися в порівнянні з низьковуглецевою сталлю. На підставі цього, середня довжина шляху (розмір зерна структурно вільного фериту і розмір міжкарбідної відстані у фериті перліту) для доставки атомів вуглецю від карбідів до дислокацій повинна зменшитися, що може розглядатися як прискорення розвитку процесів ДДС. З іншого боку, необхідно враховувати, що головний вплив від зростання об'ємної частки цементиту зв'язаний зі збільшенням сумарної площини міжфазової поверхні розподілу між феритом і цементитом та з тим, що сама границя є як місцем зародження дислокацій, так і їх анігіляції. На підставі цього, чим більша площа границь між фазами, тим більша густина рухомих дислокацій формується за поодиному ступінь дефо-

рмачії. Таким чином, умови ефективної взаємодії між рухомими дислокаціями та атомами вуглецю повинні зсуватися у бік більших сумарних деформацій. Підтверджується наведене положення характером залежності величини σ_0 та m для сталі з 0,5 % С. Як свідчать експериментальні дані [2, 4], аж до деформації стискуванням 4...5 % спостерігається суттєве зниження σ_0 і зростання m . Пов'язане це з якісними змінами дислокаційної структури фериту сталі. Відомо, що при односпрямованому деформуванні розтяганням дислокаційна чарункова структура в сталях з кількістю вуглецю 0,5 % починає формуватися приблизно після 4...5 %. Наведене явище в значній ступені знижує темп накопичення дислокацій, що пояснюється уповільненням їх руху і розвитком анігіляційних процесів. На підставі цього, зміна σ_0 та m із зростанням деформації стає значно меншою. Таким чином, можна говорити про одночасний вплив з боку зерен структурно вільного фериту і фериту перліту на процеси розвитку процесів ДДС. Причому, співвідношення між фазовими складовими сталі, в залежності від кількості вуглецю, визначає послідовну зміну домінуючого їх впливу на розвиток наведених процесів.

Таким чином, у вуглецевих сталях при незмінних температурно-швидкісних умовах деформування, тільки зміна знаку навантаження супроводжується пригнічуванням розвитку процесів ДДС. Аналогічний характер впливу спостерігається і при підвищенні вмісту вуглецю в сталі, що пов'язано зі зростанням деформації формування дислокаційних чарункових структур.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст] / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д., 2008. – 196 с.
3. Schoeck, G. The Portevin – Le Chatelier effect, a kinetic theory [Text] / G. Schoeck // Acta met. – 1984. – № 8. – P. 1224-1234.
4. Вакуленко, И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании [Текст] / И. А. Вакуленко. – Д.: Gaudeamus, 2003. – 94 с.

Надійшла до редколегії 16.12.2010.

Прийнята до друку 21.12.2010.