

## ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ РОЗДІЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНВАРІАНТНИХ МОДЕЛЕЙ

О.А. Кузін

*Національний університет "Львівська політехніка",  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013*

Застосування мікролегування для управління структурно-енергетичним станом внутрішніх поверхонь розділу (ВІР) є найперспективнішим способом покращання властивостей сталей. Його ефективне використання вимагає врахування багаторівневого характеру поверхонь розділу (наявності різних зерен і субзерен, блоків мозаїки, областей когерентного розсіювання). Незважаючи на теоретичні знання, розвиток і промисловий досвід застосування малих додатків, їхній вплив на структуру, фазовий і хімічний склад великокутових границь зерен, зеренних і субзеренних стиків, а також схильність сталей до міжзеренного руйнування вивчені недостатньо.

Обґрунтування критеріїв оцінки стану ВІР вимагає моделювання і комп'ютерного аналізу граничних зон. Для вибору раціональних способів підвищення експлуатаційної надійності мікролегованих сталей після гартування і високого відпуску використано інваріантне моделювання досліджуваних об'єктів.

Досліджували сталі 40ХГ, які додатково мікролеговані бором, РЗМ, цирконієм і молібденом після гартування від температури 1133 К і відпуску 873 К з охолодженням у воді. Частину зразків піддано вторинному окрихчувальному відпуску при 823 К протягом 2 h із подальшим повільним охолодженням.

Для виявлення границь зерен із високою роздільною здатністю використали іонно-плазмові травлення. Глибину рівчиків травлення, зумовлену різною енергією атомів на границях і внутрішніх об'ємах ґратки кристалітів, визначали інтерферометром Лінника. Електронною мікроскопією досліджували форму і розміри карбідних виділень за допомогою реплік, екстрагованих із поверхні шліфів зламів. На зразках, випробовуваних біля верхньої границі порогу холодноламкості ( $T_{10}$ ), визначено процентне співвідношення мікромеханізмів руйнування сталей.

Мікролегування істотно не впливає на міцність і пластичні характеристики сталей після гартування і високого відпуску (в'язкий стан). При введенні бору опір крихкому руйнуванню зменшується і поріг холодноламкості ( $T_{50}$ ) зміщується в бік високих температур на 20 К. Комплексне мікролегування бором і рідкісноземельними металами, празеодимом і цирконієм підвищує ударну в'язкість при від'ємних температурах, але поріг холодноламкості перебуває на рівні сталі 40ХГ. Найефективніше діє молібден, наявність якого підвищує ударну в'язкість при від'ємних температурах і зсуває поріг холодноламкості бористої сталі 40ХГ в бік низьких температур на 20...25 К. Зміна опору крихкому руйнуванню при введенні малих добавок пов'язана з їхнім впливом на здатність елементів структури до мікролокальної деформації, характер руйнування і рівень зернограничної енергії сталей після покращання, а також окрихчувальної обробки. Аналіз кривих розподілу границь зерен показав, що в сталі 40ХГ границі зерен у в'язкому стані можна поділити на три групи: з глибиною рівчаків травлення 0,15  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$  та 0,35  $\mu\text{m}$ . В окрихченому стані з'являються границі з глибиною рівчаків 0,45  $\mu\text{m}$ .

У сталі 40ХГР частка границь зерен із глибшими рівчиками після окрихчення зростає майже в два рази порівняно зі сталлю без мікролегування. При введенні РЗМ розподіл границь зерен за глибинами рівчиків однорідніший у в'язкому і в окрихченому станах. У сталі з бором і празеодимом розподіл границь зерен за енергіями аналогічний до сталі 40ХГР. Найбільш впливає комплексне мікролегування бором та цирконієм. В окрихченому стані крива розподілу границь зерен зсувається в бік рівчиків із меншою глибиною порівняно з в'язким станом. У сталі, мікролегованій бором і молібденом, розподіл границь зерен подібний до спостережуваного в бористій сталі з празеодимом.

Дослідження показали, що тріщини поширюються по границях зерен з вищою енергією, які після іонно-плазмового травлення мають глибину понад 0,35  $\mu\text{m}$ .

Використання інваріантних моделей структури дало змогу оцінити вплив розміру зерен, різнозернистості, потрійних зеренних стиків, міжзеренної енергії, а також розподілу карбідів на опір міжзеренному руйнуванню мікролегованих сталей, вибрати способи оптимізації мікроструктури з метою усунення їх окрихчення під час високого відпуску.