

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА В ЛОКАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Матюнин В.М., Демидов А.Н., Марченков А.Ю.  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

Как известно, для металлических материалов и изделий характерно наличие различного рода концентраторов напряжений (КН) – участков малых размеров, обладающих повышенными остаточными напряжениями. В зависимости от происхождения различают конструктивные, металлургические, технологические и эксплуатационные КН. Наиболее проблемными являются структурные зоны концентрации напряжений (СЗКН) – локальные объёмы металла, в которых напряжения могут превышать номинальные для данной конструкции, а иногда и достигать значений разрушающих напряжений. Типичными СЗКН являются скопления дислокаций, полос скольжения, неметаллических включений и др. Современные физические методы и технические средства контроля позволяют обнаружить СЗКН на макро-, мезо-, микроуровнях. Однако наибольшие трудности при обнаружении и последующем исследовании представляют СЗКН на мезо- и микроуровнях, когда их протяженность составляет несколько десятков микрометров.

В работе представлены результаты исследования СЗКН, обнаруженных методом магнитной памяти металла (МПМ) в трубах пароперегревателя котлоагрегата из стали 10X13Г12БС2Н2Д2. При гидроопрессовке были выявлены течи на прямолинейных участках некоторых труб. В результате исследования микроструктуры металла в местах протечек были выявлены трещины (рис. 1а), а также СЗКН технологического происхождения, в которых наблюдается скопление полос скольжения (рис. 1б, 1в). Исследования на оптическом микроскопе с увеличением 1000х (рис. 1в) металла в вершине СЗКН показали, что средняя длина полос скольжения составляет  $\approx 15$  мкм, а расстояние между ними 0,5-1 мкм.

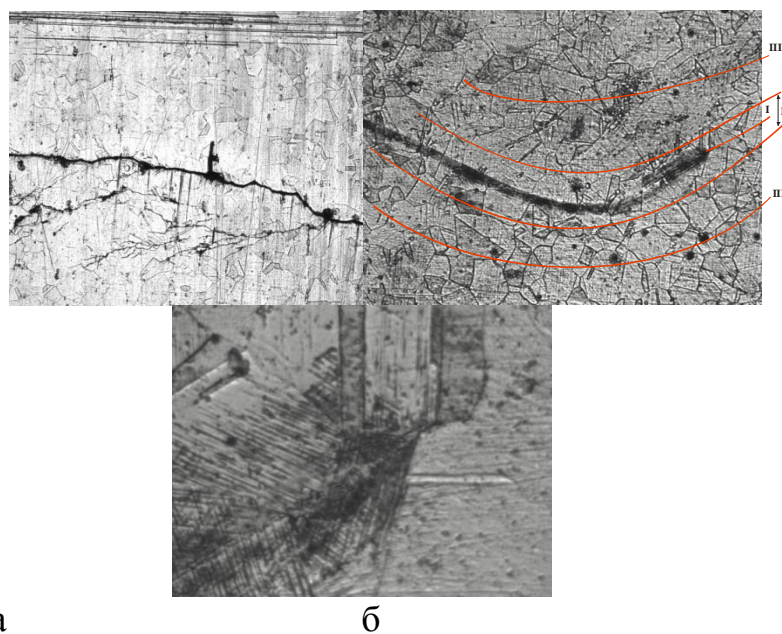


Рис. 1. - Дефекты, выявленные в трубе из стали 10X13Г12БС2Н2Д2: а – трещины,  $\times 100$ ; б – скопление полос скольжения,  $\times 100$ ; в – вершина СЗКН,  $\times 1000$

Оценить механические свойства металла в таких зонах концентрации напряжений весьма проблематично. В настоящее время с помощью метода индентирования на макроуровне можно определять макротвёрдость, предел текучести, временное сопротивление и равномерную деформацию. Однако, в малых объёмах металла, когда индентирование происходит на мезо и микроуровнях, возможно определение только мезо- или микротвёрдости, т.к. не существует чётких методик определения характеристик прочности и пластичности металла по характеристикам мезо- и микротвёрдости.

Для оценки механических свойств в малых объёмах металла в СЗКН было предложено производить индентирование металла вне СЗКН на макроуровне (отпечаток с диагональю  $d_1$ , рис. 2) и на микроуровне с малой нагрузкой (отпечаток с диагональю  $d_2$ , рис. 2). Отношение, учитывающее изменение твёрдости металла при переходе с макроуровня на микроуровень, имеет вид:

$$\beta = \frac{HV_{\text{микро}}}{HV_{\text{макро}}} \quad (1)$$

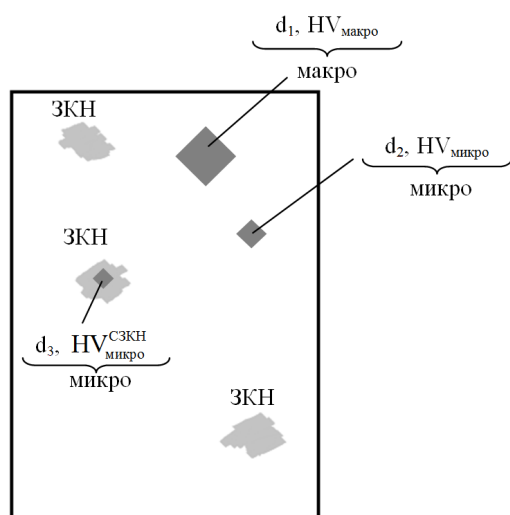


Рис. 2. Схема определения механических свойств в СЗКН методом индентирования

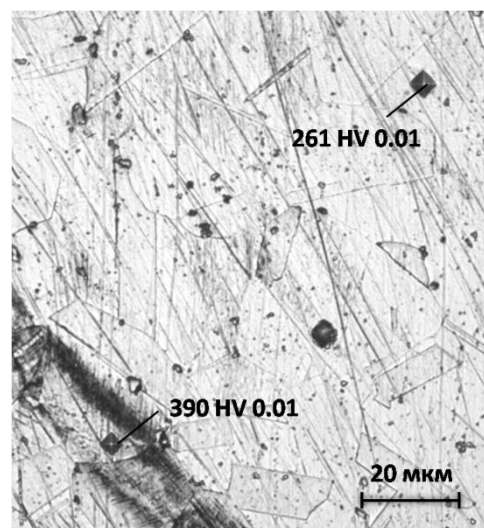


Рис. 3. Определение механических свойств металла в СЗКН трубопровода из стали 10X13Г12БС2Н2Д2

Ранее [1] было установлено, что этот коэффициент  $\beta$ , учитывающий влияние масштабного эффекта на характеристики твёрдости металла, не зависит от структурно-механического состояния металла и является константой для конкретного материала.

Затем, определив микротвёрдость в СЗКН (отпечаток с диагональю  $d_3$ , рис. 2) и зная  $\beta$ , можно рассчитать значение макротвёрдости металла в СЗКН:

$$HV_{\text{макро}}^{\text{СЗКН}} = \frac{HV_{\text{микро}}^{\text{СЗКН}}}{\beta} \quad (2)$$

Для исследуемой СЗКН были проведены испытания металла микроиндентированием с определением микротвёрдости  $HV_{0,01}$ . Для металла, расположенного вне СЗКН, были проведены испытания макро- и микроиндентированием с определением макротвёрдости  $HV_{10}$ , микротвёрдости  $HV_{0,01}$  и коэффициента  $\beta = HV_{0,01}/HV_{10}$ . Зная коэффициент  $\beta$ , можно было рассчитать макротвёрдость  $HV_{10} = HV_{0,01}/\beta$  для ме-

талла в СЗКН. Результаты испытаний и расчётов представлены в таблице. Принимая примерно равными значения макротвердости по Виккерсу HV10 и Бринеллю HB<sub>2,5/187,5/5</sub>, можно было оценить временное сопротивление  $\sigma_B$  по HB<sub>2,5/187,5/5</sub> металла в СЗКН и вне СЗКН по ГОСТ 22761-77. Из таблицы видно, что приращение  $\Delta\sigma_B$  в СЗКН за счет деформационного упрочнения составило 265 Н/мм<sup>2</sup> (27 кГ/мм<sup>2</sup>).

*Результаты определения механических свойств металла  
трубопровода из стали 10X13Г12БС2Н2Д2*

| HV, кГ/мм <sup>2</sup><br>вне ЗКН | HV, кГ/мм <sup>2</sup><br>в ЗКН | $\beta$ | $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кГ/мм <sup>2</sup> )<br>вне ЗКН | $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup><br>(кГ/мм <sup>2</sup> ) в ЗКН | $\Delta\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кГ/мм <sup>2</sup> )<br>в ЗКН |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------|---|---|---|
| Макроуровень                      |                                 | 1,485   | Макроуровень  |   |   |
| 176 HV <sub>10</sub>              | 263 HV <sub>10</sub>            |         | 579 (59.0)  | 858 (87.5)  | 279 (28.5)  |
| Микроуровень                      |                                 |         |   |   |   |
| 261 HV <sub>0,01</sub>            | 390 HV <sub>0,01</sub>          |         |   |   |   |

С использованием полученных результатов была проведена расчётная оценка приращения напряжения в СЗКН по модели Тейлора [2] и критического напряжения, необходимого для образования трещины, по модели Зинера-Стро [3]. Сопоставление расчётных значений напряжений с экспериментальными, определёнными методами микроиндентирования [1], показало их близкое совпадение.

*Список использованных источников*

1. Матюнин В.М., Демидов А.Н., Марченков А.Ю. Определение механических свойств металла в зонах концентрации напряжений (ЗКН) изделий машиностроения // Технология металлов. 2009. №7. – С. 19-22.
2. Иванова В.С. и др. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. М.: Наука, ИМЕТ им. А.А. Байкова, 1965.
3. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Metallurgia, 1974.