

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Д. А. САРКИСЯН

О СВЯЗИ ТРЕЩИН ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ  
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С МИКРОТВЕРДОСТЬЮ  
И ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ II РОДА

Трещинообразование в стали, как известно, зависит от многих таких факторов, как дефекты структуры, состав стали, влияния примесей, несовершенства процесса производства изделий и других причин, которые подробно описаны, например в [1, 2, 3]. В последние годы в связи с развитием методов металлофизики представляется возможным проведение подробных исследований связи микротрещин со свойствами металла в зоне их локализации. В статье автора исследованы микротвердость и остаточные напряжения II рода в районе расположения трещин, с целью установления связи их распространения с напряженностью материала.

Измерение напряжений второго рода представляется целесообразным по следующим причинам. Остаточные напряжения I рода, уравнивающиеся в объеме всего изделия, могут увеличивать в растянутых областях и уменьшать в сжатых участках склонность к трещинообразованию.

Наличие высоких напряжений I рода (например, при закладке [1]) может привести к образованию трещин в изделиях. Однако локализация отдельных микротрещин около микродефектов и определенных структурных составляющих стали не может обуславливаться напряжениями I рода. Микротрещины распространяются в пределах зерен и блоков. Поэтому естественно их связывать с напряжениями II рода, уравнивающимися в таких же объемах.

Искажения II рода, уравнивающиеся в объеме нескольких атомов, не могут оказывать заметного влияния на характер распространения трещин. В соответствии с [4], искажения II рода могут считаться одной из основных причин упрочнения металла. Зависимость между величинами микротвердости и остаточными напряжениями представляет интерес, так как позволяет оценивать характер наклепа стали и склонность ее к трещинообразованию.

В настоящей работе образцы типа сосудов, специально изготовленные путем глубокой вытяжки, подвергались ударным нагрузкам. При этом на некоторых из них возникали трещины вдоль направления вытяжки. Из указанных образцов вырезывались участки с на-

ружными трещинами длиной 60—80 м.м, удобные для проведения исследований отдельных микроучастков. На некоторых из них в областях, непосредственно примыкающих к трещине, после соответствующих шлифовки и полировки, измерялась микротвердость. Шлифовка и полировка проводились на малую глубину в целях уменьшения дополнительного наклепа стали. Влияние наклепа сводилось до минимума путем промеров микротвердости на приборе ПМТ-3 при наибольшей нагрузке 200 грамм [5, 6]. Измерения напряжений II рода производились на установке для рентгеноструктурного анализа УРС-50И.

### Измерения микротвердости в дефектных участках

Исследовались образцы из малоуглеродистой стали, содержащей 0,09% С, 0,35% Мп, менее 0,12% Si, менее 0,025% S, менее 0,025% P, подвергнутые после вытяжки низкотемпературному отжигу при температуре 340°С с выдержкой в 60 минут.

На рис. 1 показан средний участок трещины\* на образце, деформированном на  $\epsilon = 15\%$ . Перепад в величинах микротвердостей по обеим сторонам трещины колеблется от 30 до 58 кг/м<sup>2</sup>.

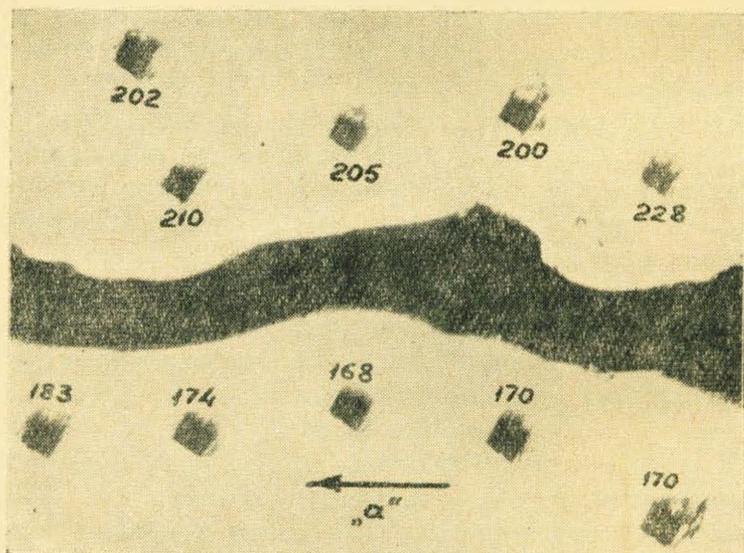


Рис. 1. Участок микротрещины \* 0.

На микроснимке рис. 2 приведен микроучасток образца, деформированного на  $\epsilon = 25\%$ , имеющий трещину (средний участок), на котором видна значительная неоднородность величин отпечатков алмазной пирамиды\*\*, около которых указаны числа микротвердости.

\* На всех рисунках стрелкой „α“ указывается направление распространения трещины.

\*\* Измерение микротвердости (рис. 2а, 2б) производилось при нагрузке 100 г.

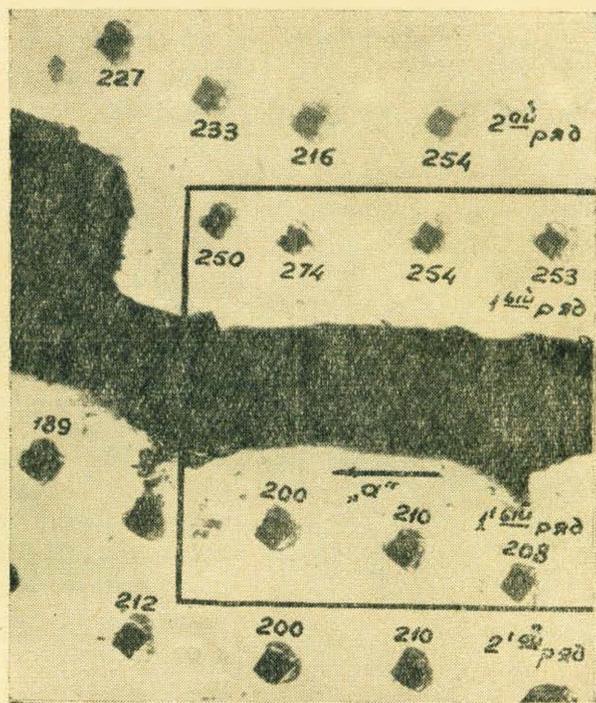


Рис. 2. Средний участок микротрещины  $\times 130$ .

Микротвердость с одной стороны трещины в среднем заметно выше, чем с другой ее стороны. Разность между величинами микротвердости по обеим сторонам трещины колеблется от 38 до 74 единиц.

Результаты измерений микротвердости микроучастков около трещины указали на сохранившуюся после термической обработки значительную неоднородность наклепа материала, явившегося, видимо, причиной образования трещины на исследованном участке. Конец микротрещины имел весьма малую толщину (0,003 мм) и практически не мог оказать заметного влияния на механические характеристики близлежащих слоев металла. Именно в этих слоях производилось измерение микротвердостей с целью получения значений наибольших перепадов в величинах микротвердостей по обеим сторонам трещин, достигших 29—283 кг/мм<sup>2</sup>. Тщательное измерение микротвердости в различных микроучастках образцов, не имеющих трещин, показало, что обычно таких больших перепадов микротвердости не наблюдалось, в то же время в образцах с трещинами имелись многие микроучастки со значительной неоднородностью по микротвердости. Эти дефектные участки, наряду со структурными несовершенствами, являются наиболее вероятными местами образования трещин.

На микроснимке рис. 3 показан микроучасток образца около конца наружной трещины со степенью деформации  $\varepsilon = 20\%$ .

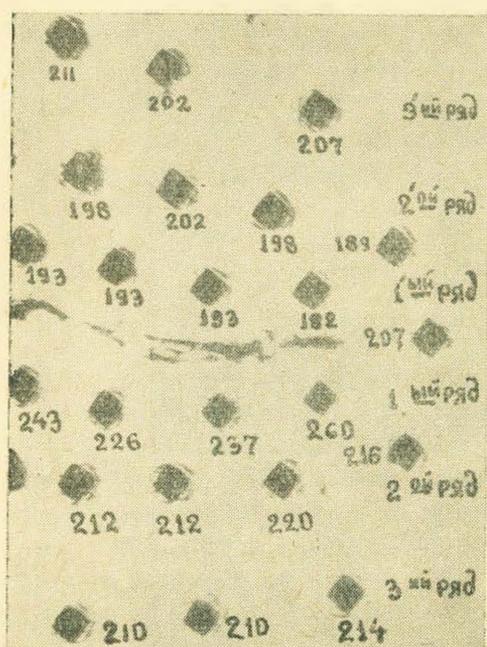


Рис. 3. Конец микротрещины  $\times 100$ .

Таким образом, существующий по обеим сторонам трещин перепад микротвердости постепенно выравнивается. Значения микротвердости достигают средних величин по образцам: для первого образца (рис. 1)  $H_v = 195 \text{ кг/мм}^2$ , для второго (рис. 2а, 2б)  $H_v = 220 \text{ кг/мм}^2$ , для третьего (рис. 3)  $H_v = 273 \text{ кг/мм}^2$  и для четвертого (рис. 4)  $H_v = 210 \text{ кг/мм}^2$ .

На рис. 4 изображен фотоснимок микротрещины в образце, деформированном в среднем на  $\varepsilon = 35\%$ . Трещина, встретив участки металла с высокой микротвердостью, меняет свое направление движения и распространяется (расширяется) в направлении участков с малой твердостью. На фотографии видны некоторые отпечатки индентора в непосредственной близости от края трещины ( $H_v = 244 : 170 : 228, 256, 216 \text{ кг/мм}^2$ ). Эти измерения, как известно, имеют качественные значения, однако иллюстрируют наличие „разрыхленного“ слоя металла с малой твердостью. Указанный участок вероятно и послужил причиной изменения направления распространения трещины (стрелка 1), встретившей микроучастки металла (по дуге 3—3) с высокой твердостью ( $H_v = 400, 415, 433 \text{ кг/мм}^2$ ), в сторону „разрыхленных“ слоев металла (стрелка 2). Однако следует отметить, что наличие „разрыхленного“ слоя обнаруживается и в относительном отдалении от трещины (2-ой ряд измерений), где  $H_v = 256, 273 \text{ кг/мм}^2$

На фотографии видно, что первые ряды отпечатков микротвердости расположены на большем расстоянии от краев трещины, чем аналогичные измерения на другом образце. Несмотря на это, качественная картина распределения микротвердости сохраняется, и значения перепадов величин микротвердости достаточно велики ( $\Delta H_v = 33 - 78 \text{ кг/мм}^2$ ).

Представленные рисунки показывают, что при удалении отпечатков от более твердых сторон микротрещин (последовательно 1-й, 2-ой и 3-й ряды измерений) имеет место уменьшение микротвердости, а от менее твердых сторон микротрещин (1'-й, 2'-ой, 3'-й ряды измерений) микротвердость увеличивается.

и т. д. В то время как образец имеет микротвердость вне дефектного участка\* в среднем  $H_v = 330 \text{ кг/мм}^2$ .

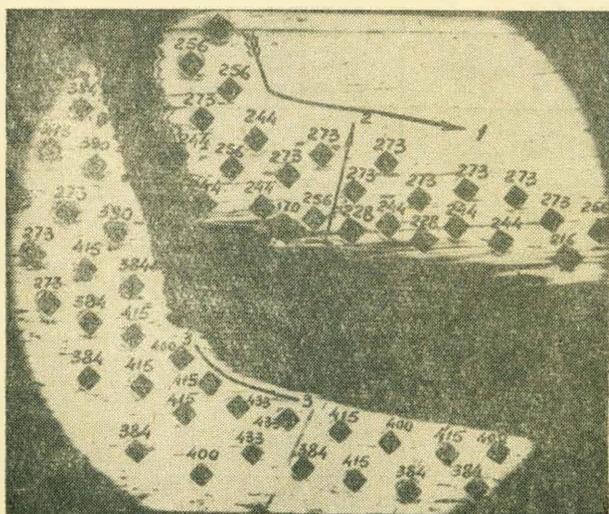


Рис. 4. Микротвердость около микротрещины, изменившей направление распространения  $\times 80$ .

### Измерения напряжений II рода в дефектных участках

Для выяснения взаимосвязи остаточных напряжений II рода и микротвердости произведены измерения напряжений в тех же участках образцов. Результаты подтвердили предположение о существовании пропорциональной связи между напряжениями и микротвердостью.

Для проведения измерений из образцов со стороны образовавшейся трещины были вырезаны три пластинки, шириной 1,5 мм и длиной в 15 мм. Пластинки готовились для измерений напряжений II рода. Рентгенограммы, полученные с кристаллографических плоскостей (110) и (220) обрабатывались по методике [7, 8]. На тех же пластинках производился промер микротвердости. Результаты измерений обрабатывались методом математической статистики.

Результаты измерений и расчета напряжений II рода, а также величины микротвердости, определенные по тем же плоскостям пластинок, с которых снимались напряжения, представлены в табл. 1.

Полученные данные подтверждают предположение о наличии «разрыхленного» слоя металла, лежащего непосредственно у трещины, в связи с чем модальное значение  $H_v$  пластинки № 1 ( $233 \text{ кг/мм}^2$ ) меньше, чем несколько удаленной пластинки № 2, где мода микро-

\* Границей дефектных участков в работе считались участки образцов, достаточно удаленные от трещины, начиная с которых наличие закономерного перепада в величинах значений микротвердостей, по обе стороны от трещины, не наблюдалось. З. Изв. ТН, № 6

Таблица 1

Напряжения II рода и микротвердость пластинок, расположенных на различных расстояниях от трещины.

Характеристика образцов		Кристаллографическая плоскость	Измеренная ширина линий		$\delta_{110(220)}$ $B_{110(220)}$	$B_0$ $B_{110(220)}$	Истинная ширина линии $B_0$ (с.м)	$\frac{B_{110(220)}}{B_0}$	$\frac{\beta}{B_0}$	$\beta_{110(220)} \times 10^3$ ( $\rho$ )	$\frac{\beta_2}{\beta_1}$	$\frac{\Delta a}{a} \times 10^3$	Напряжения II рода $\sigma_{11}$ гк/м.м <sup>2</sup>	Микротвердость $H_v$ кг/м.м <sup>2</sup>
наименование образцов	расстояние центральной оси исследуемых пластинок до кромки трещины (м.м)		$B_{110(220)}$ (с.м)	$B_{110(220)} \times 10^3$ ( $\rho$ )										
Эталон		(110)	2,427	5,291	0,386	0,877	4,640							
Пл. № 1	0,75		3,012	6,566	0,311	0,925	6,063	0,765	0,644	3,905	3,538	0,63	13,86	233
Пл. № 2	2,25		3,312	7,220	0,283	0,941	6,794	0,683	0,731	4,966	3,365	0,68	14,96	254
Пл. № 3	3,75		3,250	7,085	0,288	0,938	6,646	0,698	0,715	4,752	3,315	0,59	12,98	225
Эталон		(220)	5,346	11,654	1	0,656	7,645							
Пл. № 1	0,75		10,147	22,127	0,601	0,712	15,754	0,485	0,877	13,816				
Пл. № 2	2,25		11,308	24,651	0,539	0,745	18,365	0,416	0,910	16,712				
Пл. № 3	3,75		10,850	23,653	0,552	0,729	17,443	0,438	0,903	15,751				

где  $\delta_{110}$  — междублетное расстояние для кристаллографической плоскости (110) =  $2,04 \cdot 10^{-3} \rho$ , $\delta_{220}$  — междублетное расстояние для кристаллографической плоскости (220) =  $13,3 \cdot 10^{-3} \rho$ , $B_{110}$  — ширина линии эталона (110), исправленная на дублетность, $B_{220}$  — ширина линии эталона (220), исправленная на дублетность, $\beta$  — истинная ширина линии ( $\beta_1$  — для линии (110),  $\beta_2$  — для линии (220), исправленная на дублетность и геометрию съемки, $a$  — параметр решетки.

твердости равна  $254 \text{ кг/мм}^2$ . Этот участок трещины был местом концентрации напряжений. Далее на пластинке № 3 микротвердость уже меньше 225 единиц, и в дальнейшем, по мере удаления от трещины, микротвердость уменьшается и доходит до значения средней величины микротвердости образца 206 единиц.

Напряжения II рода на пластинке № 1 равны 13,86, на пластинке № 2—14,9 и на пластинке № 3—12,98  $\text{кг/мм}^2$ . Полученные величины, несмотря на их близость, характеризуют разрыхленность металла у трещин, тем более, что их изменение находится в соответствии с изменением микротвердости.

Измерения микротвердости и остаточных напряжений II рода в районе дефектных мест образцов из малоуглеродистой стали, полученных вытяжкой, позволяют сделать следующие выводы:

Трещины, образовавшиеся при больших скоростях, распространяются по наименее прочным участкам образца по местам с наибольшей разрыхленностью, характеризующимся малой микротвердостью.

Путем прямых измерений показано изменение остаточных напряжений второго рода в районе распространения трещины, находящееся в соответствии с микротвердостью. Изделия с неоднородностью по микротвердости и остаточным напряжениям II рода, возникшим в процессе их изготовления, обладают повышенной склонностью к трещинообразованию.

Исследования показали, что распространение трещин в материале может быть связано с неоднородностью в распределении остаточных напряжений II рода и микротвердости.

Тульский механический институт

Поступило 15.VI 1959

Կ. Ա. ՍԱԵԿՍՅԱՆ

ՄԻԿՐՈՎԱՐՈՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ II ՏԻՊԻ ՄՆԱՑՈՐԳԱՅԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ  
ՀԵՏ ՍԱՌՆԱԶԵՎԱԲՈՒՆՎԱԾ ՍԱԿԱՎԱԾՆԵԱՆՆԱՅԻՆ ՊՈՂՊՍՏԻ ՀԱՅՎԱԿՈՐՈՒ-  
ԹՅԱՆ ԿԱՊԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ու լ մ

Հողվածում բերված են սակավածխածնային պողպատում միկրոճաքերի տարածման շրջանում եղած միկրոկարծրությանը և II տիպի մնացորդային լարմանը վերաբերող տվյալներ:

Պողպատի քաղքալմանը նպաստում են շինվածքների առանձին տեղամասերում լարումների կենտրոնացումը և նրանց անհամասեւությունը: Մնացորդային լարումների՝ մասնավորապես II տիպի լարումների՝ տարածման անհավասարաչափությունն առաջանում է շինվածքների պտտրաստման պրոցեսում անհամասեւ ձեւափոխության հետեանքով: Ասավել ձեւափոխված տեղամասերն ունեն ավելի մեծ մնացորդային լարումներ և միկրոկարծրություն: Հաքերը տարածվում են շինվածքների առավել փխրանայած մասերում:

Ուղղակի չափումների միջոցով հաշտարելիս են ճաքերի տարածման շրջանում II տիպի մնացորդային լարումների տեղի ունեցող փոփոխությունները և նրանց համապատասխանությունը միկրոկարծրության նշանակություններին:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гуляев А. П. Металловедение, 193, 1956.
2. Саррак В. И. Хрупкое разрушение металлов. Успехи физических наук, том XVII, выпуск 2, 1959.
3. Крупин А. В. Исследование дефектов в металле как концентраторов напряжений. Москва, 1958 (диссертация).
4. Голубков В. М., Ильина В. А., Крицкая В. К., Курдюмов Г. В., Перкас М. Д. Проблемы металловедения и физики металлов, № 5, стр. 433, 1958.
5. Хрущев М. М., Беркович Е. С. Микротвердость, определяемая методом вдавливания, Изд. АН СССР, 1943.
6. Шапошников Н. А. Механические испытания металлов. Машгиз, 317, 1951.
7. Лысак Л. И. „Вопросы физики металлов и металловедения“. № 3, Изд-во АН УССР, 1952.
8. Megaw H., Stokes, A., Journ. Inst. Metals, 279, 1945.