

УДК 620.179.14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА  
ПО ПАРАМЕТРАМ ТВЕРДОСТИ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ  
НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ  
МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

А. А. ДУБОВ, \* Ал. А. ДУБОВ, \* А. Н. ДЕМИДОВ

ООО «ЭНЕРГОДИАГНОСТИКА»

\*НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Реутов, Москва, Россия

Известно, что основными источниками повреждений оборудования и конструкций являются локальные зоны концентрации напряжений (ЗКН), обусловленные металлургическими и технологическими дефектами изготовления, рабочими нагрузками или их сочетанием. Наличие ЗКН как на новых изделиях, так и на изделиях, бывших в эксплуатации, значительно снижает их ресурс. Поэтому контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий и определение ЗКН с использованием средств неразрушающего контроля представляется в ГОСТ Р 52330-2005 наиболее важной задачей при контроле НДС. Именно для решения этой задачи – выявление ЗКН на основе 100 % обследования оборудования и конструкций, предлагается использовать метод магнитной памяти металла (МПМ), который получает все большее распространение на практике.

После того, как выявлены ЗКН, при оценке ресурса требуется определить механические свойства металла в этих зонах. Однако определение механических свойств металла в ЗКН, имеющих малую протяженность (от десятка до нескольких сотен мкм), весьма проблематично.

Из существующих методов контроля механических свойств для этих целей наиболее перспективен метод индентирования. Этот метод, известный под названием "безобразцовый метод", позволяет определять не только характеристики твердости, но и показатели других механических свойств металла, например, предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), временное сопротивление ( $\sigma_b$ ), равномерную деформацию ( $\delta_p$ ) и др. [1, 2]. В основе безобразцового метода лежат корреляционные связи характеристик твердости с характеристиками прочности, но эти связи установлены для макроуровня, на котором деформируемые объемы металла при вдавливании индентора и растяжении образца сравнительно велики. При уменьшении деформируемых объемов металла начинает проявляться масштабный фактор, следствием которого является повышение определяемых значений твердости и прочности. Для ЗКН, имеющих малую протяженность, возможно применение только метода микротвердости, определяемой вдавливанием пирамиды. Однако значения микротвердости могут превосходить значения макротвердости в 1,5–2 раза из-за влияния масштабного фактора.

Такое же увеличение твердости происходит и при вдавливании сферического индентора. Чем меньше диаметр индентора, тем выше твердость по Бринеллю, но при условии постоянства отношения диаметра отпечатка к диаметру индентора.

Аналогичное влияние оказывает масштабный фактор на характеристики прочности, определяемые растяжением образцов. Известно значительное увеличение прочности разрывных образцов диаметром менее 1 мм.

В связи с вышеизложенным, возникает вопрос о характере связи твердости и прочности на микро- и макроуровне и возможности их взаимного пересчета.

Для ответа на эти вопросы в лаборатории кафедры "Технология металлов" МЭИ были проведены специальные эксперименты на образцах одной марки стали при растяжении и вдавливании. В результате выполненных экспериментов, были выявлены следующие два условия подобия. Первое условие обеспечивает одинаковые масштабные уровни при растяжении и вдавливании за счет равенства абсолютного изменения площади поперечного сечения образца  $\Delta F$  и площади поверхности отпечатка  $M$  ( $\Delta F=M$ ). А второе условие обеспечивает при этом равенство относительных деформаций при растяжении образца  $\Psi^{pac}$  и вдавливании индентора  $\Psi^{вд}$  ( $\Psi^{pac}=\Psi^{вд}$ ). Для выполнения этих условий целесообразно использование сферического индентора, который позволяет получать различные значения пластической деформации за счет изменения угла вдавливания в процессе одного нагружения.

Для количественной оценки средней пластической деформации при вдавливании сферического индентора  $\Psi^{вд}$  предложена следующая формула [2]:

$$\Psi^{вд}=1-[1-(d/D)^2]^{1/2}=0,5t/D=t/R, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр отпечатка;  $t$  – глубина отпечатка;  $D$  – диаметр индентора;  $R$  – радиус скругления индентора.

Предложенные условия подобия и формула (1) позволили подобрать необходимый исходный диаметр образца для растяжения  $d_0$  по используемому диаметру индентора  $D$ .

В качестве материала для исследований был взят пруток диаметром 20 мм из стали 35. От прутка были отрезаны шайбы для испытаний на вдавливание и заготовки для изготовления разрывных образцов. Для проведения механических испытаний были изготовлены сферические инденторы с диаметрами  $D=0,1-10$  мм и цилиндрические пятикратные разрывные образцы с исходными диаметрами  $d_0=0,6-10$  мм.

Испытания образцов на растяжение выполнялись на универсальной машине "Instron", позволяющей изменять шкалы нагрузок в зависимости от  $d_0$ . При растяжении образцов различного диаметра были определены предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление  $\sigma_b$ , абсолютные изменения площади

поперечного сечения образцов на уровне предела текучести  $\Delta F_{0,2}$  и на уровне временного сопротивления  $\Delta F_B$ .

Испытания вдавливанием инденторов различного диаметра выполнялись на модернизированном приборе МЭИ-Т7, снабженным встроенным микроскопом для измерения диаметров отпечатков и сменными силовыми пружинами для обеспечения требуемой точности измерения нагрузки.

На рис.1 представлены экспериментальные зависимости  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  от  $d_0$  и  $HB_{0,2}$ ,  $HB_B$  от  $D$ , полученные по результатам испытаний растяжением образцов диаметром  $0,6 \div 10$  мм и проволочных стальных образцов диаметром  $150 \div 350$  мкм, предварительно отожженных для снятия наклепа, а также вдавливанием инденторов различных диаметров ( $0,1 \div 10$  мм).

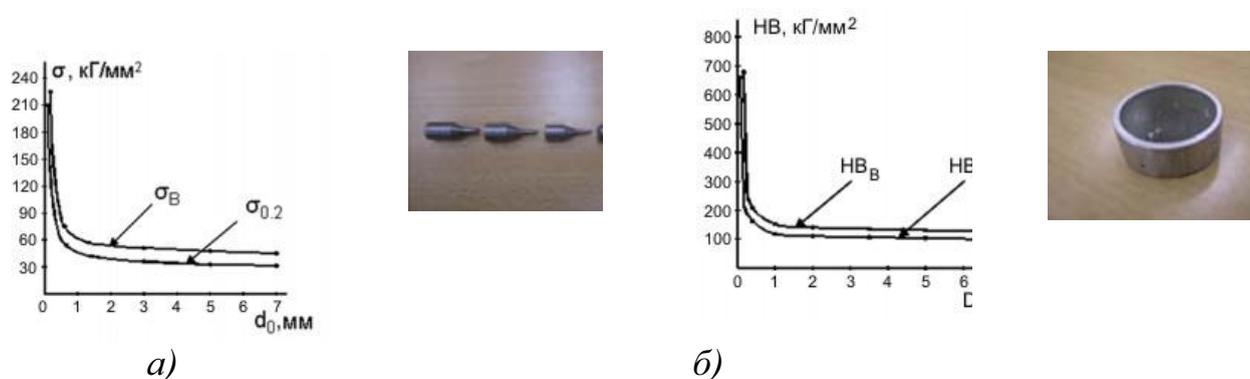


Рис.1. Изменения  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  в зависимости от  $d_0$  (а), и изменения  $HB_{0,2}$ ,  $HB_B$  в зависимости от  $D$  (б)

Из рис. 1 видна явная аналогия в изменениях характеристик прочности и твердости, что свидетельствует об общих закономерностях влияния масштабного фактора при переходе от макро- к микроуровню деформирования металла. Причем, для проволочных образцов (микроуровень) значения отношений  $\sigma_{0,2}/HB_{0,2}$  и  $\sigma_B/HB_B$  также как для макрообразцов, оказались примерно равным  $1/3$ .

На участке зависимостей  $HB_{0,2}=f(D)$  и  $HB_B=f(D)$  при  $D < 1$  мм наблюдается значительное увеличение характеристик твердости. Аналогичное увеличение характеристик прочности наблюдается и на зависимостях  $\sigma_{0,2}=f(d_0)$  и  $\sigma_B=f(d_0)$  при  $d_0 < 1$  мм. Анализ экспериментальных данных показал, что эти участки можно аппроксимировать экспоненциальными зависимостями. Аналогичные зависимости были получены для микро- и макрообразцов, изготовленных из стали 20.

На основе выполненных исследований, разработана методика определения механических свойств металла в ЗКН, выявленных методом МПМ. Путем индентирования на мезо- микроуровнях с последующим пересчетом значений механических свойств ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ) на макроуровень изделия.

Известно, что отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  является диагностическим параметром структурно-механического состояния металла ЗКН по методу МПМ. Если

это отношение находится в пределах 0,5–0,8, то металл еще не склонен к хрупкому разрушению, и вероятность зарождения трещин низка. Однако при увеличении этого отношения и приближении его к единице металл исчерпывает запас упрочняемости, его равномерная деформация очень мала, и вследствие этого, контролируемая ЗКН представляет опасность, так как в ней могут образоваться трещины. В этом случае информацию о состоянии металла в ЗКН следует дополнить металлографическим анализом с помощью метода пластических реплик.

Следует также отметить, что значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$ , полученные по результатам измерений микротвердости в ЗКН зависят от уровня остаточных напряжений (ОН) в этой зоне. Чем выше уровень ОН, тем больше значения твердости и других механических характеристик мы получим в результате указанных измерений. При этом оценку уровня ОН в ЗКН возможно выполнить методом МПМ, используя энергетическое соотношение между магнитными и механическими характеристиками, представленное в работе [3].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марковец М. П.** Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979.–191 с.
2. **Матюнин, В. М.** Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов / В. М. Матюнин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006 – 214 с.
3. **Дубов, А. А.** Метод магнитной памяти металла и приборы контроля : учеб. пособие / А. А. Дубов, А. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М. : ЗАО «Тиссо», 2008 – 363 с.